

柔構造遊泳ロコモーションにおける自律分散制御

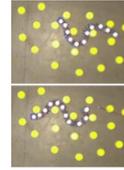
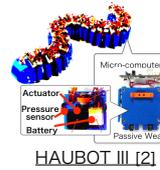
風間 俊哉 統計思考院・数学協働プログラム 特任助教



はじめに

ヘビは、陸上では複雑な地形でも移動でき、また種類によっては、水中を遊泳したり、滑空飛行したりする。興味深い点は、四肢のない単純な細長い身体に、頭部から尾部に向かって波を送るという比較的単純な運動でありながら、質的に異なる環境でロコモーションできるということである。本研究では、こうした多環境適応性を生み出すメカニズムとして、自律分散システムの可能性を検討する。具体的には、既存の陸ヘビロボットにおける自律分散制御が、海ヘビロボットにも適応可能かどうかという問題に焦点を当てて、簡素な流体構造連成モデルにより解析した結果[1]を報告する。

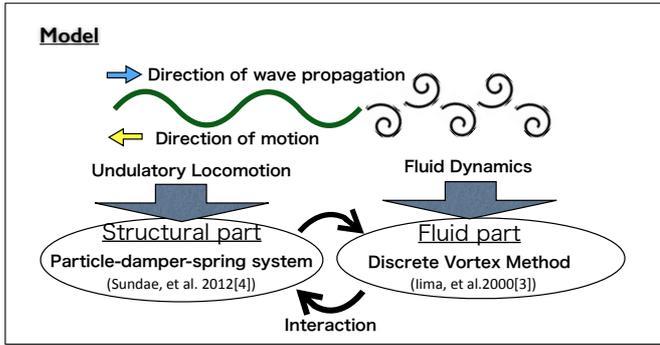
ヘビ型ロボットの自律分散制御：環境適応的な運動生成



Q: 水中でも機能するか?

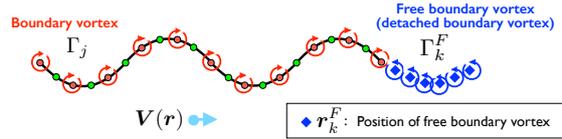
数理モデルで検証

数理モデル



Fluid Part

Discrete Vortex Method: The fluid motion and flow on the body are approximated using vortex blobs.



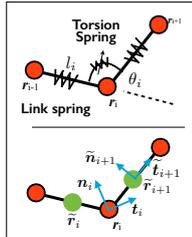
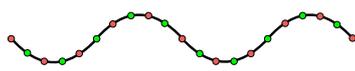
$$V(r) = \sum_{j=0}^N \frac{\Gamma_j}{2\pi|r-r_j|^2} J(r-r_j) + \sum_{k=1}^K \frac{\Gamma_k^F}{2\pi|r-r_k^F|^2} J(r-r_k^F)$$

Γ was determined according to the slip boundary condition and Kelvin's theorem.

Slip condition
 $V(\tilde{r}) \cdot \tilde{n}_i = \tilde{v}_i^n$
 Kelvin's theorem
 $\sum_{j=0}^N \Gamma_j + \sum_{k=1}^K \Gamma_k^F = 0$

$$\Delta \tilde{P}_i = \tilde{V}_i^t \frac{\tilde{\Gamma}_i}{l_i} + \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^j \tilde{\Gamma}_k$$

Structural Part



Newton's equation of motion

$$m_i \dot{v}_i = F_i$$

$$F_i = F_i^{ls} + F_i^{td} + F_i^{ts} + F_i^{td} + F_i^p + F_i^s$$

Spring Damping
Spring Damping
Pressure Friction
Link
Torsion
Fluid

Force from torsional spring

$$F_i^{ts} = -\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{l_i} \tilde{n}_i + \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{l_{i+1}} \tilde{n}_{i+1}$$

Torque : $\tau_i = -\kappa(\theta_i - \theta_i^N)$

Natural angle

Pressure force acting on i-th link is calculated by pressure difference

$$\tilde{F}_i^p = \Delta \tilde{P}_i l_i \tilde{n}_i$$

$$\Delta \tilde{P}_i = \tilde{P}_i^L - \tilde{P}_i^R$$

Averaged force acting on i-th particle

$$F_i^p = (\tilde{F}_i^p + \tilde{F}_{i+1}^p)/2$$

結果

1. Predefined undulating motion control

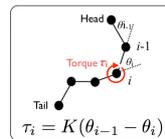
$$\theta_i^N = A \sin \phi_i, \quad \dot{\phi}_i = \omega$$

Initial Condition

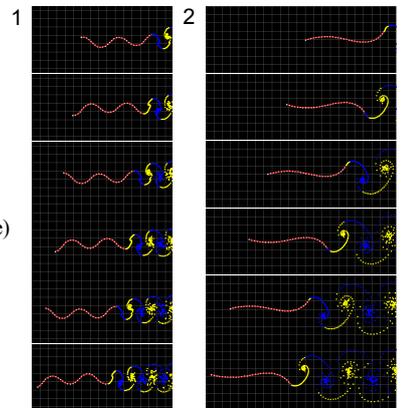
$$\phi_i = 2\pi n(1 - i/N)$$

2. Curvature Derivative Control

$$\theta_i^N = \begin{cases} A \sin \phi_i & \dot{\phi}_i = \omega \quad (i=1) \\ \theta_{i-1} & \text{(otherwise)} \end{cases}$$



(Date, et al. 2001 [6])



まとめと今後の展望

近年、生物学、数理学、ロボット工学の研究者が協働して、生物に学ぶことで複雑で不確定な環境の中をしなやかに、かつタフに動けるロボットを作ろうとする研究が加速している[7]。その中で、自律分散システムは、鍵を握るメカニズムとして着目され、大自由度かつ環境適応的なロボットの制御に活用されている[8]。本発表では、簡素な流体構造連成モデルを用いて、海ヘビのロコモーションにおける自律分散制御の検討結果を報告した。モデルは、ヘビの構造をバネマスダンパ系で流体を離散渦法により表現し、ヘビのように動く柔構造と流体の渦構造とが相互作用する系を表現でき、さらに、種々の身体制御方法を試すことが可能である。今回得られた結果の中で、自律分散制御を組み込んだ海ヘビが、遊泳の際その身体が未広がりになることは、実際の海蛇の報告[9]とも一致し興味深い。今後は、流体中より効率的に動くための柔構造の遊泳推進メカニズムを、より詳細に解析していく予定である。

参考文献

1. Kazama, T. Kano, M. Iima, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, "On the applicability of the decentralized control mechanism of snake locomotion to sea snake locomotion", Proc. of ISABMEC 2014, 2014.
2. T. Kano and A. Ishiguro, "Obstacles are beneficial to me! Scaffold-based locomotion of a snake-like robot using decentralized control," 2013 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., pp. 3273–3278, Nov. 2013.
3. M. Iima and T. Yanagita, "Is a Two-dimensional Butterfly Able to Fly by Symmetric Flapping?," J. Phys. Soc. Japan, vol. 70, pp. 578, 2001.
4. 砂田靖志, et al., 視界情報を用いた直感的ヘビロボット操縦システムの構築, 第 25 回自律分散 システムシンポジウム 予稿集 (2013).
5. J. Katz and A. Plotkin, "Low-Speed Aerodynamics", Cambridge University Press, 2001.
6. H. Date and Y. Takita, "Adaptive locomotion of a snake like robot based on curvature derivatives," 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., pp. 3554-3559, 2007.
7. 風間俊哉, "ヒラムシの進行・遊泳に学ぶ柔構造ロコモーション制御", 計測と制御, 54-4, 260-264, 2015.
8. 石黒章夫, 稲垣伸吉 編, "特集:「自律分散システムとロコモーション」", 計測と制御, 54-4, 2015.
9. J. B. Graham and W. R. Lowell, "SURFACE AND SUB-SURFACE SWIMMING OF THE SEA SNAKE PELAMIS PLATURUS," J. exp. Biol., vol. 127, pp. 27744, 1987.

謝辞

本研究は、加納剛史助教、石黒章夫教授(東北大学)、飯間信准教授、小林亮教授(広島大学)との共同研究です。科研費(挑戦的萌芽研究、課題名:生物ロコモーションの通底原理から拓くマルチテストリアルロボットの設計論、課題番号:25630175、代表者:石黒章夫)からの援助を受けて実施しました。ここに感謝の意を表します。